



УДК 662.76

АНАЛИЗ ПГУ-ВЦГ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ**ANALYSIS OF IGCC WITH VARIOUS TYPES OF ENTRAINED-FLOW GASIFIERS**

Смирнов Алексей Игоревич, студент каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Богатова Татьяна Феокистовна, канд. техн. наук, заведующий каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: t.f.bogatova@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-47-31

Осипов Павел Валентинович, старший преподаватель каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Alexey I. Smirnov, student, Department «Thermal Power Plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia

Tatyana F. Bogatova, Doctor Sc., Head of the Department «Thermal Power Plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: t.f.bogatova@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-47-31

Pavel V. Osipov, Senior Lecturer, Department «Thermal Power Plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: p.v.osipov@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-47-31

Аннотация: Основными факторами, влияющими на эффективность ПГУ-ВЦГ, являются технологии газификации угля, характеристики угля, способ его подачи в газификатор, принятые в технологической схеме решения. Наиболее распространенными в настоящее время являются поточные газификаторы, они составляют около 80% всех газификационных мощностей в мире. Выбор оптимальных технологических решений позволит повысить эффективность ПГУ-ВЦГ.

Abstract: The major factors influencing IGCC efficiency are technologies of coal gasification, the characteristic of coal, the method of coal feed into the gasifier, the technological scheme decisions. Entrained-flow gasifiers are the most widespread now, they are about 80% of all gasification capacities in the world. The choice of optimal technology solutions will allow to increase IGCC efficiency.

Ключевые слова: ПГУ-ВЦГ; поточный газификатор; экономичность; кислородное дутье; воздушное дутье, сухая подача угля, ВУС.

Key words: IGCC; entrained-flow gasifier; efficiency; oxygen blast; air blast, coal dry feed, CWS.

ВВЕДЕНИЕ

Применение ПГУ с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) являются альтернативой традиционному паросиловому циклу. Его преимуществами являются высокая степень адаптивности к качеству топлива, низкий уровень выбросов NO_x , SO_x и CO_2 и высокий КПД по сравнению с традиционной угольной ТЭС.

Основными факторами, влияющими на эффективность ПГУ-ВЦГ, являются технологии газификации угля, характеристики угля, способ его подачи в газификатор, принятые в технологической схеме решения. Наиболее распространенными в настоящее время являются поточные газификаторы, они составляют около 80% всех

газификационных мощностей в мире. Выбор оптимальных технологических решений позволит повысить эффективность ПГУ-ВЦГ.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПОТОЧНЫХ ГАЗИФИКАТОРОВ

Современные коммерческие газификаторы разделяют по типу окислителя, используемого для газификации, на газификаторы с кислородным и с воздушным дутьем. Для подачи топлива в газификатор применяются два основных способа – мокрый с подачей угольной пыли в смеси с водой в виде водоугольной суспензии (ВУС) и сухой с использованием в качестве транспортирующего

агента, например, азота. Поточные газификаторы с мокрой топливоподачей являются наиболее компактными, так как подача топлива в виде ВУС возможна при высоких давлениях в реакторе (до 10 МПа), что позволяет уменьшить объемные расходы рабочего тела и габариты газификатора и вспомогательных систем. Но калорийность получаемого при этом синтез-газа на 15–30 % ниже, чем при сухой подаче топлива, а химический КПД составляет 70–76 %. Применение сухой подачи топлива в газификатор позволяет увеличить химический КПД на 4,5–10 %, снизить потребление кислорода на 20–25%, расширить возможности использования низкосортных углей [1, 2]. Однако максимальное давление в газификаторе с сухой подачей лимитируется уровнем в 4–6 МПа. Это связано с проблемой подачи мелкодисперсного топлива в реактор высокого давления.

В данной статье рассматриваются следующие виды поточных газификаторов:

- газификатор с сухой топливоподачей, с кислородным дутьем, с реактором со стенками мембранного типа, с квенчингом (охлаждением) рециркуляцией газа и охладителем синтез-газа (например, Shell, Prenflo, Siemens), рис. 1;
- газификатор с мокрой топливоподачей в виде ВУС, с кислородным дутьем, с реактором с огнеупорным покрытием, водяным квенчингом или охладителем синтез-газа (например, GE, Техасо), рис. 2;
- двухступенчатый газификатор с сухой топливоподачей, с воздушным дутьем, с реактором со стенками мембранного типа, с химическим квенчингом и полной рециркуляцией углеродистого остатка (например, МНИ), рис. 3.

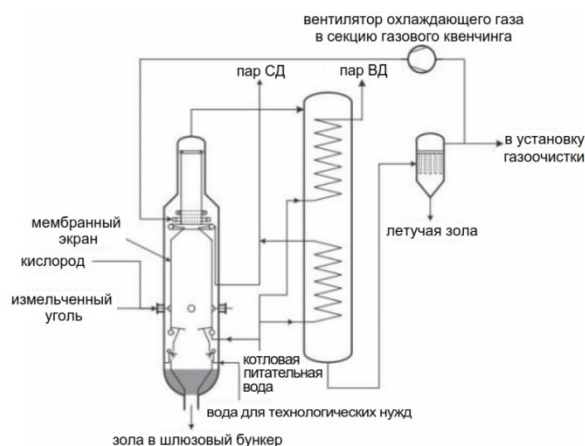


Рис. 1. Принципиальная схема с газификатором Shell

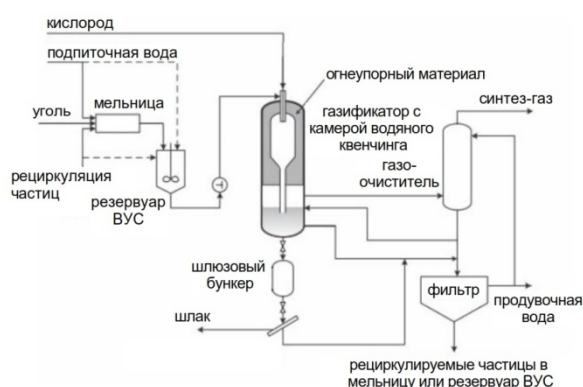


Рис. 2. Принципиальная схема с газификатором GE-Texaso

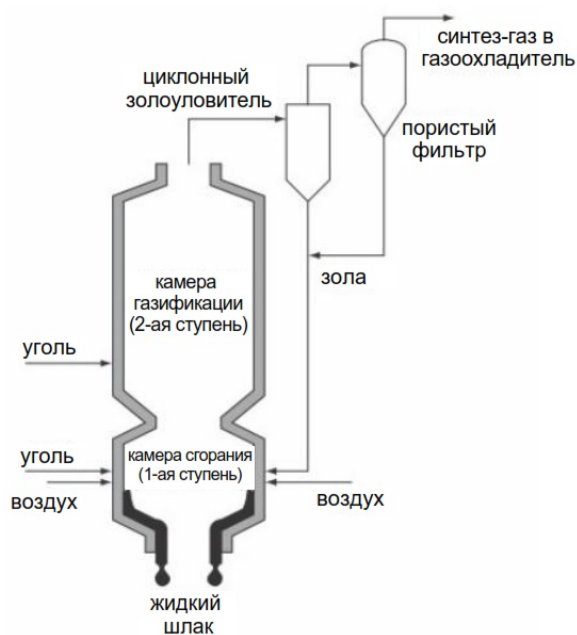


Рис. 3. Принципиальная схема с газификатором МНИ

Газификатор с мокрой топливоподачей требует на 20% ~ 25% больше кислорода в качестве окислителя по сравнению с газификатором с сухой топливоподачей, поскольку для испарения всей воды из водо-угольной суспензии требуется дополнительная теплота. В результате больше углерода окисляется до углекислого газа в случае с ВУС, что снижает химический КПД. Эта проблема еще более усугубляется при использовании низкосортных углей с высоким содержанием влаги, поскольку эта влага не вносит никакого вклада в транспортные свойства суспензии, и для транспортировки угля вода должна быть добавлена в значительных количествах (от 30% до 40% от массового расхода угля). Повышенное потребление кислорода приводит к увеличению размера воздуходелительной установки (ВРУ) и соответственно к увеличению потребления энергии на собственные нужды. В конструкции,

предназначенной для подачи ВУС, используется шламовый насос для подачи водо-угольной суспензии в газификатор, что позволяет газификатору работать при очень высоких давлениях, характерных для заводов по переработке угля и химические продукты. Однако такие высокие давления не требуются для установки ПГУ-ВЦГ (IGCC), поскольку давление подачи топлива в камеру сгорания газовой турбины обычно составляет менее 3 МПа.

В случае газификатора с сухой топливopодачей размер и потребляемая мощность ВРУ ниже, а химический КПД выше, чем в случае подачи в виде ВУС, для того же сорта угля. Эти газификаторы используют газовый квенчинг в газификаторе при 900°C с использованием охлажденного до 200°C и очищенного синтез-газа [3]. В результате получаемая температура синтез-газа достаточно высока, чтобы обеспечить эффективную рекуперацию теплоты, и при этом достаточно низкая, чтобы переносимые потоком синтез-газа частицы расплавленного шлака затвердели. Это затвердевание частиц шлака имеет важное значение для предотвращения загрязнения охладителя синтез-газа и другого оборудования, расположенного далее по ходу движения газа. Однако по сравнению с химическим квенчингом, используемым в двухступенчатом газификаторе на воздушном дутье, такая схема охлаждения приводит к увеличению затрат электроэнергии на собственные нужды.

В двухступенчатом газификаторе с сухой топливopодачей уголь подается в две зоны. В нижнюю первую ступень подается часть угля и обогащенный кислородом (до 25%) воздух, эта ступень работает при высокой температуре в условиях шлакообразования. Остальная часть угля подается в верхнюю ступень, что действует как химический квенчинг для газов из первой ступени. Эта верхняя ступень работает без шлакообразования. Частицы в синтез-газе содержат коксовый остаток и непрореагировавший углерод. Они удаляются из газа после охладителя синтез-газа и рециркулируются в нижнюю первую ступень. Таким образом, этот газификатор не только обеспечивает очень высокую конверсию углерода, но также гарантирует, что вся зола удаляется из системы в виде шлака.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ОКИСЛИТЕЛЯ И СПОСОБА ПОДАЧИ ТОПЛИВА НА СОСТАВ СИНТЕЗ-ГАЗА

В случае использования в качестве окислителя кислорода его необходимо производить в воздухоразделительной установке (ВРУ), которая потребляет значительное количество энергии на

собственные нужды, снижая общую эффективность электростанции. Для газификации с воздушным дутьем также используют ВРУ, но гораздо меньшей мощности (примерно 15% от мощности ВРУ для установки с кислородным дутьем). Основным продуктом в этом случае является газообразный азот, необходимый для транспортировки угля в газификатор. А кислород является побочным продуктом и его обычно смешивают с воздухом, получая таким образом обогащенный кислородом воздух в качестве окислителя.

Тип окислителя, используемый для газификации (воздух или кислород), влияет на состав синтез-газа, полученный в газификаторе. Типичные составы синтез-газов для газификаторов на воздушном и кислородном дутье приведены в таблице 1 [4].

Таблица 1
Типичный состав очищенного синтез-газа (мол.%)

Компонент	МНІ	Кислородное дутье	Кислородное дутье
	Воздушное дутье	Сухая топливopодача	ВУС
Температура	120°C	180°C	210°C
CO	30,50	54,5	38,4
H ₂	10,50	28,2	27,5
CO ₂	2,80	3,8	12,0
H ₂ O	5,00	9,1	20,0
Ar	0,5	1,0	0,1
N ₂	50,9	3,4	1,5
H ₂ S	0,001	0,13	0,11
CH ₄	0,5	0,0	0,1
Итого	100,00	100,00	100,00

Концентрация компонентов серы (H₂S и COS) зависит от содержания серы в угле. Синтез-газ из газификатора на воздушном дутье будет содержать также значительное количество азота. Кроме того, содержание метана будет выше в двухступенчатом газификаторе с воздушным дутьем. Напротив, высокое содержание воды в ВУС, подаваемой в газификатор, благоприятствует shift-реакции (реакции сдвига) в газификаторе, что приводит к более высокому соотношению H₂:CO и более высокому содержанию CO₂ по сравнению с сухой топливopодачей.

Для анализируемых трех технологий газификации составы синтез-газа, приведенные в таблице 1, использовались в качестве состава питательного синтез-газа. В модели, выполненной в Aspen Plus, регулировался расход пара, подаваемого для реакции сдвига и байпасного расхода для получения целевой концентрации CO₂ в синтез-газе на выходе. Результаты моделирования представлены в таблице 2 [1].

Таблица 2
Технология газификации и конверсия СО

Параметр	Воздушное дутье с сухой подачей	Кислородное дутье с сухой подачей	Кислородное дутье с ВУС
Расход синтез-газа, кг/ч	250,0	250,0	250,0
Степень улавливания углерода	65%	65%	65%
СО ₂ в подаваемом синтез-газе	2%	3,8%	12%
Н ₂ О в подаваемом синтез-газе	10%	28,2%	27,5%
Расход СО через байпас	33,7%	30,3%	37,8%
Отношение пара к сухому газу на выходе (опр. потребностью в паре для shift-реакции)	0,3	0,3	0,3
Подача пара в shift-реактор, кг/ч	87,82	139,50	67,50
Расход ВУС в газификатор, кг/ч	---	---	37,00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В технологии газификации с воздушным дутьем пар не добавляется, соответственно содержание воды в синтез-газе заметно ниже. Содержание воды здесь связано с влагой, содержащейся в угле. Содержание воды в синтез-газе, получаемом в кислородном газификаторе с сухой топливоподачей выше за счет добавления пара в газификатор. Аналогичным образом, содержание воды в газификаторе с кислородным дутьем, работающим на ВУС, определяется количеством воды, используемым для получения ВУС.

2. Содержание СО₂ в синтез-газе, полученном в газификаторе на ВУС с кислородным дутьем, заметно выше из-за необходимости повышать температуру воды в ВУС до температуры газификации (приблизительно 1500°C). Это снижает нагрузку на shift-реактор, что приводит к снижению потребности в паре для реакции сдвига.

3. С точки зрения общей эффективности важно понимать различие между паром, добавленным для shift-реактора СО, и водой в ВУС, нагретой в газификаторе. Пар, добавленный в процессе конверсии СО, генерируется путем рекуперации теплоты в энергетическом блоке путем нагревания питательной воды в котле-утилизаторе до примерно 300°C. А вода, содержащаяся в ВУС, должна быть нагрета до температуры газификации

1500°C за счет сжигания угля с соответствующим образованием СО₂, что менее эффективно, несмотря на рекуперацию теплоты в охладителе синтез-газа.

4. Основная причина, по которой шифтинг синтез-газа, получаемого в газификаторе с воздушным дутьем, обуславливает более низкую общую потребность в воде/паре, связана с присутствием азота в синтез-газе. Реакция сдвига СО представляет собой экзотермическую реакцию. Добавляемый пар не только отвечает требованиям реакции, но также выполняет функции теплоотвода для удаления теплоты, образующейся в реакторе, и тем самым способствует протеканию реакции сдвига. В случае с синтез-газом, производимом в воздушном газификаторе, содержащийся в синтез-газе азот сам работает как теплоотвод, уменьшая общую потребность в паре для обеспечения преобразования СО в СО₂.

Двухступенчатая технология газификации с воздушным дутьем имеет определенные преимущества перед технологиями газификации с кислородным дутьем (независимо от способа топливоподачи – сухая или ВУС). Эти преимущества в основном связаны со снижением эксплуатационных расходов, сокращением объема отходов и лучшей управляемостью. Основным недостатком технологии с воздушным дутьем является увеличение стоимости удаления Н₂С и СО₂ в установке очистки от кислых газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Parulekar. Comparison between oxygen-blown and air-blown IGCC power plants: a gas turbine perspective // GT2011-45154. 2011. P. 1-9.
2. А. Ф. Рыжков, Т. Ф. Богатова, Цзэн Линянь, П. В. Осипов Развитие поточных газификационных технологий в Азиатско-Тихоокеанском регионе (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – № 11. – С. 1–12.
3. Victoria Maxim, Calin-Cristian Cormos, Ana-Maria Cormos and S. Agachi, Mathematical Modeling & Simulation of Gasification Processes with Carbon Capture and Storage (CCS) for Energy Vectors Poly-Generation, in 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE 20.2010.
4. Michiel C. Carbo, Daniel Jansen, Jan Wilco Dijkstra, Ruud W. van den Brink, and A.H.M. Verkerk, Precombustion Decarbonisation in IGCC: Abatement of Both Steam Requirement and CO₂ Emissions // Sixth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration. 2007: Pittsburgh PA, U.S.A.
5. L. Zheng, E. Furinsky. Comparison of Shell, Texaco, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations // Energy Conversion and Management. 2005. №46.